




# 항공기용 고강도 알루미늄 합금 주조 부품 개발

	<b>김 경 현</b>
	<b>한국기계연구원</b>


- 재료연구부 책임연구원
- 관심분야 : Al, Mg 합금 및 주조 부품 개발
- E-mail : khkim@kmail.kimm.re.kr

<b>이 정 무</b>	
<b>한국기계연구원</b>	

- 재료연구부 선임연구원
- 관심분야 : 알루미늄 합금개발, 금속기지 복합재료
- E-mail : jmoolee@kmail.kimm.re.kr

	<b>박 수 현</b>
	<b>대신금속 (주)</b>

- 대신금속(주) 대표이사
- 관심분야 : 방산부품/특수차량부품 Al 주조
- E-mail : shpark@ds-al.com

<b>김 회 곤</b>	
<b>대신금속 (주)</b>	

- 기술연구소 연구원
- 관심분야 : Al합금개발, 방산부품/특수차량부품 Al 주조
- E-mail : dsmrnd@ds-al.com

## 1. 연구 배경

알루미늄은 강도가 높고 비중이 낮으며 기계적 특성과 내식성 등이 우수하여 항공기나 수송기계, 일반 산업 기계, 구조물 등에 다양하게 사용되고 있다. 산업의 고도화와 더불어 고품질, 고성능의 부품 수요가 증가하고 있으며, 항공우주, 방산 분야, 수송기계 분야에서 고품위의 알루미늄 주조품에 대한 수요가 증가하면서 그에 대응하는 신주조공정과 합금개발이 추진되었다. 그 결과 일반 알루미늄 주조품에 비하여 강도와 연성이 향상된 알루미늄 합금 주조품이 개발되고 제32회 국제주물회의에 이 결과가 처음 보고되면서 주목을 받았다. 미국에서는 이를 premium quality casting이라 부르며, 실제 주조품으로서 고강도를 지니며 제조공정에서도 철저한 관리를 통하여 그 품질이 신뢰받을 수 있는 주조품을 제조하는 것이다.

특히, 항공기용 알루미늄합금 주조부품은 높은 안정성과 신뢰성 및 고정밀도가 요구되며 품질 수준은 Class 1, Grade B등급이상으로서 제품 내부에 수축공, 기포 및 비금속개재물이 철저히 배제되어야 한다. 재료적인 측면에서는, 항공기용 알루미늄 주조합금으로 널리 사용되는 A357 합금의 인장강도는 310MPa 정도로 높은 수준이다. 이상의 특성을 갖는 premium급의 주조품을 제조하기 위해서는, 제조 공정에서 최적의 주조방안을 선정하고, 적절한 용탕 관리를 통하여 기공과 비금속 개재물을 최소화하여, 건전한 주조

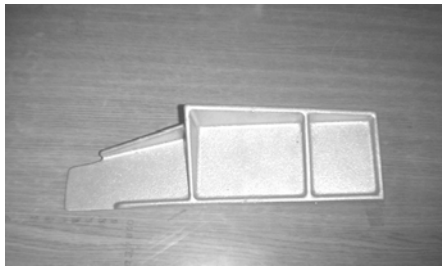
조직을 갖는 제품을 얻는 것이 필수적이다.

본 고에서는 T50 고등훈련기와 민항기에 소요되는 부품인 항공기 기체용 inlet lip, stop, support 등의 개발 사례를 중심으로 항공기용 고강도 알루미늄 주조품의 개발 기술을 소개하고자 한다.

## 2. 기술 개발 결과

### 2.1 제품의 형상

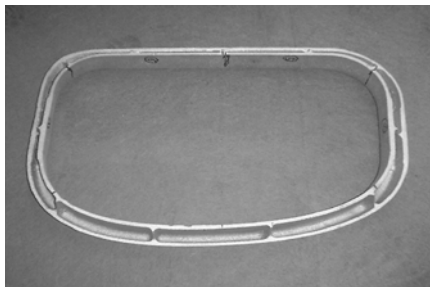
그림 1은 stop, support, inlet lip시제품의 사진이다. 시제품의 요구 재질, 치수, 기계적 특성은 표 1과 같다



(a) Stop



(b) Support



(c) Inlet lip

그림 1. 개발부품의 형상

### 2.2 주조 방안의 확립

#### 2.2.1 응고 해석

최적의 주조 방안을 선정하기 위하여 제품을 주조하기 전에 응고 해석 software를 이용하여 응고해석을 수행한다. 그림 2의 flow chart는 제품의 응고 해석을 수행하는 절차를 나타내고 있다. 우선 제품의 도면을 3차원 형상으로 만들기 위해서 3D CAD Program인 Ideas를 사용하여 제품을 3차원 형상data인 STL파일로 만든 후 이 data를 MAGMAsoft의 MAGMApre로 data를 변형시켜 입력하며 여기에 runner, riser 등을 다시 입력하고 MAGMAmesh에서 mesh를 생성시킨다. 해석을 하기 위해서 각각의 물성치(재질, 온도, 밀도, 열전도도 등)를 입력하여 유동 및 응고 simulation을 실행한다. 계산이 끝난 뒤 Post Processing에서 그 결과를 볼 수 있다.

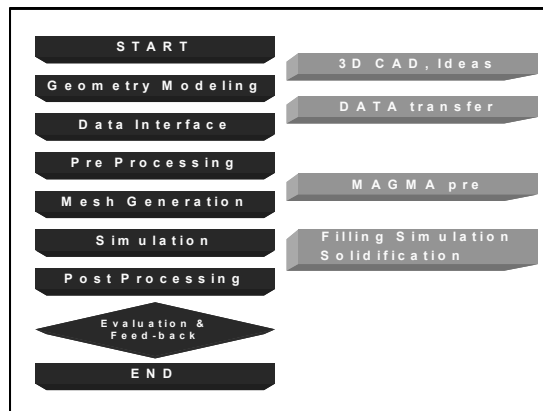


그림 2. Flow chart of simulation

그림 3은 stop 시제품의 응고해석 결과로서, shrinkage defect가 발생할 위치를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 riser 부근은 용탕 공급을 충분히 하고 있어 결함이 존재하지 않으나 riser가 없는 제품의 모서리 부분은 빠른 응고로 인해 수축 결함이 나타나고 있다. 이런 수축 결함을 없애기 위해서는 제품의 모서리 부분에 riser를 추가적으로 더 세워서 용탕 공급을

표 1. 개발 부품의 요구 재질, 치수 및 기계적 특성

부 품 명	Stop	Support	Inlet lip
재 질	A356-T6	A356-T6	A357-T6
기계적 특성	인장강도 : 270MPa 연신율 : 3%	인장강도 : 270MPa 연신율 : 3%	인장강도 : 310MPa 연신율 : 4%
치 수(mm)	304(L) x 102(W) x 63.5(H)	127(L) x 102(W) x 51(H)	635(L) x 406(W) x 178(H)
특 징	X-ray grade는 C grade로서 치수 정밀도가 중요.	X-ray grade는 C grade로서 치수 정밀도가 중요.	X-ray grade는 B grade로서 치수 정밀도, 표면조도와 열처리 시 소재 뒤틀림 방지가 중요.

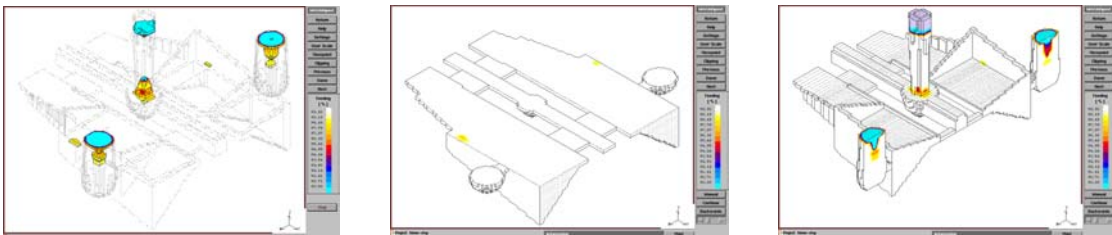


그림 3. Stop의 shrinkage defect result

원활하게 하여 응고가 균일하게 진행되도록 하여야 하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 주조 방안 선정시에 응고 해석을 수행하면 시행 오류를 줄이며 개발 기간을 단축할 수 있다.

### 2.2.2 금형 설계 및 제작

개발 제품중 inlet lip은 현재까지 국내에서는 압출재를 가공하여 사용하고 있다. inlet lip의 주조품 개발에 있어서 주요 관리 항목으로는 제품의 두께, 표면조도, 내부결함 등 이다. 이 중에서 제품의 두께 경우는 inlet lip의 가장 얇은 부위의 두께는 2.5mm이다. 이 경우는 주조품으로는 이 두께를 형성할 수 없으므로 주조 후 가공으로서 두께 문제를 해결해야한다. 그리고 내부결함을 제거하기 위해서 적절한 주조방안을 설정하여 금형을 제작하여야 한다. 그림 4는 inlet lip의 금형으로서 초기 금형은 제품의 형상과 주조조건을 확립하기 위해서 riser를 세우지 않았다. 그림 5는 금형에 11개의 riser 세운 1차 금형 수정 후의 사진이다.

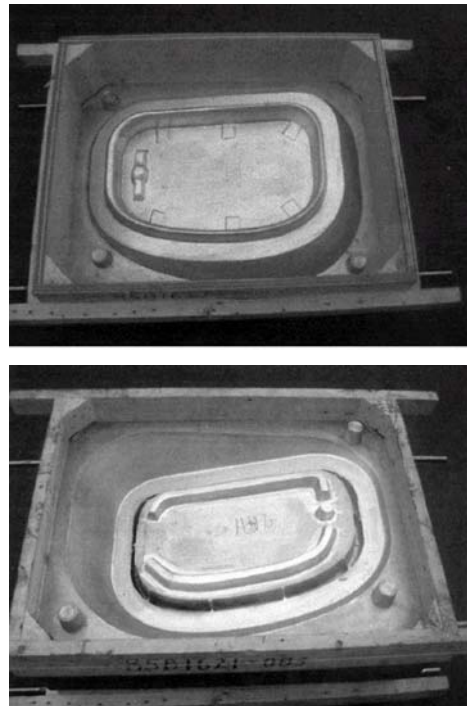


그림 4. Inlet lip 금형

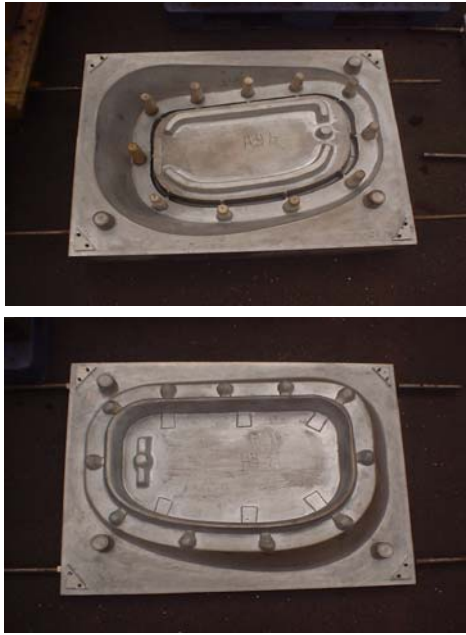
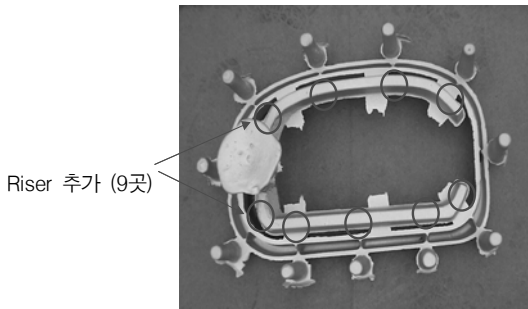


그림 5. Inlet lip의 1차 수정 금형



	Riser 개수	Riser 크기	Riser neck 크기
개선 전	11EA	∅35×H90mm	W35×H5×L10mm
개선 후	20EA	∅50×H130mm	W35×H15×L10mm

그림 6. Inlet lip 주조 방안

### 2.2.3 시제품 제조

대기중의 250kg 가스로서 순 Al과 Al-Si 등의 모합금을 사용하여 용해하였다. 용해 작업은 예열, 드로스제거, 개량처리, 탈가스, 진정, 주입 순으로 작업을 하였다. Al-Si 합금이므로 Sr으로 개량처리를 하였고, 개량처리시 용탕 온도는 약 740℃ 정도였다. 개량처리가 끝난 후

特 輯

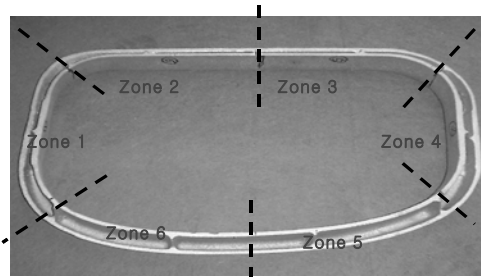
탈가스처리를 위해 용탕을 약 15분 동안 Ar gas bubbling 처리를 하였으며 탈가스가 발생하는 dross를 제거한 후 약 5분간 진정 후 주입을 하였다, 이때 출탕온도는 760℃정도이며 주입온도는 740℃ 정도이다.

그림 1(c)는 inlet lip의 1차 시제품 사진이다.

그림에서 보는 바와 같이 1차 시제품 경우는 rib 안쪽 부위에서 수축이 발생하였다. 이는 rib 영향으로 수축이 발생하였다고 판단되어진다.

또한 시제품 비파괴 검사 결과 산화물이 존재하고 있었다. 1차 시제품 제조 결과를 바탕으로, 수축을 방지하고 또한 산화물을 제거하기 위하여 수축이 발생하는 부위에 riser를 세우는 방식으로 주조 방안을 수정하였다.

그림 6은 최종적인 주조 방안을 선정하여 금형을 수정 보완한 그림이다. 즉 riser가 있는 부위는 수축과 산화물이 존재하지 않으나 riser 없는 부위는 산화물이 존재하고 있기 때문에 rib 안쪽과 바깥쪽에 모두 riser를 세우면 산화물이 제거되었고, riser neck 사이즈를 표와 같이 보다 길게 변경하였다.



	Spec	주조방안 개선 전		주조방안 개선 후	
		등급	결함종류	#1	#2
Zone 1	Grade B	Grade D	Shrinkage 3 Gas porosity 3	Grade B	Grade B
Zone 2	Grade B	Grade C	Shrinkage 1 Gas porosity 3	Grade B	Grade B
Zone 3	Grade B	Grade C	Shrinkage 2	Grade B	Grade B
Zone 4	Grade B	Grade D	Shrinkage 4	Grade B	Grade B
Zone 5	Grade B	Grade C	Gas porosity 3	Grade B	Grade B
Zone 6	Grade B	Grade C	Shrinkage 2	Grade B	Grade B

그림 7. Inlet lip 비파괴 검사 결과

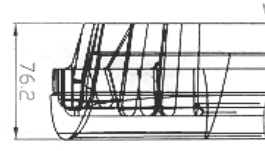
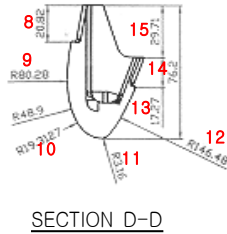
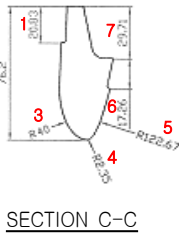
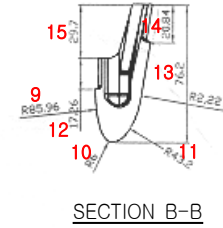
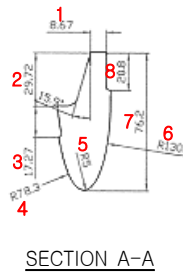
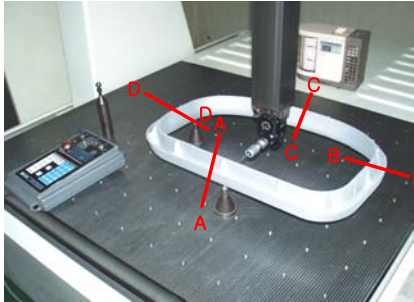
2.2.4 시제품 비파괴 검사

그림 7은 inlet lip의 비파괴 검사 결과를 주조 방안 변경전, 후를 비교하여 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 주조 변경 전의 시제품에서는 내부 결함이 존재하는 것을 알 수 있었다. 결함의 종류로는 수축과 gas porosity 등이다.

그러나 주조 방안을 변경한 시제품의 경우는 비파괴 등급이 모두 B Grade 이상인 우수한 제품으로 판명되었다.

2.2.5 시제품 치수 검사

inlet lip 시제품의 소재 치수를 검사하였다.



단위:mm

No	Spec.	공차	Act.	비고	No	Spec.	공차	Act.	비고
1	20.83	±0.762		가공부위	9	R80.28	0.762	R80.8	합격
2	76.2	±0.762	76.8	합격	10	R19.31	0.762	R19.80	합격
3	R40	0.762	R40.5	합격	11	R3.16	0.762	R3.76	합격
4	R2.35	0.762	R2.7	합격	12	R146.48	0.762	R146.9	합격
5	R122.67	0.762	R123	합격	13	17.27	±0.762		가공부위
6	17.26	±0.762		가공부위	14	76.2	±0.762	76.8	합격
7	29.71	±0.762	30.3	합격	15	29.71	±0.762	30.4	합격
8	20.82	±0.762		가공부위					

단위:mm

No	Spec.	공차	Act.	비고	No	Spec.	공차	Act.	비고
1	2.54	±0.254	8.7	가공부위	9	R85.96	0.762	R86	합격
2	29.72	±0.762	30.4	합격	10	R6	0.762	R6.5	합격
3	17.27	±0.762		가공부위	11	R43.2	0.762	R43.8	합격
4	R78.3	0.762	R78.97	합격	12	17.26	±0.762		가공부위
5	R5	0.762	R5.5	합격	13	76.2	±0.762	76.8	합격
6	R130	0.762	R130.7	합격	14	20.84	±0.762		가공부위
7	76.2	±0.762	76.7	합격	15	29.7	±0.762	30.4	합격
8	20.8	±0.762		가공부위					

그림 8. Inlet lip 시제품 치수 검사 결과

그림 8은 시제품의 치수검사 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 소재 치수 검사는 3차원 측정기에서 실시하였고, 네 개의 section을 기본으로하여 치수를 측정하였다. 치수 측정 결과 소재 치수는 Spec. 치수를 모두 만족하고 있다.

### 2.3 용탕 처리

#### 2.3.1 최적의 교반 조건 설정

자동차, 항공기등 구조용 주조부품으로 사용되는 합금 주물의 특성을 결정하는 인자로는 크게 재료가 갖는 특성과 제조공정이 있다. 재료적인 특성으로는 화학조성이 있으며 A356, A357합금과 같은 경우에는 첨가되는 Si, Mg의 함량 및 불순물로 첨가되는 Fe의 함량이 특성을 결정하는 주요한 성분이다. 제조 공정면에서는 주물제조시의 응고속도, 주물의 열처리방법, 주물의 건전성 등이 있다. 주물의 건전성이라함은 주물내에 함유된 수소농도를 최소화하고 비금속 개재물의 양을 최소화하고, 조직을 미세하고 개량처리되게 하는 것을 의미하는 것으로 일반적으로 건전한 주조품을 얻기 위하여 현장에서는 다양한 용탕처리를 한다. 용탕처리 방법중 수소 농도와 비금속개재물의 양을 줄이는데는 GBF(gas bubbling filtration)에 의한 탈가스 처리 공정이

효과적이다. GBF 장치는, 용탕내부로 Ar 등과 같은 불활성 가스를 불어 넣어 가스 표면에 수소나 비금속 개재물을 흡착시켜 용탕내부의 수소나 비금속 개재물을 제거하는 방법이다. GBF 장치가 효과적인 역할을 수행하기 위하여서는 GBF 장치에서 발생하는 Ar bubble의 크기가 미세하고 분포가 균일하여야 한다.

그림 9는 수모델 실험에서 얻어진 결과를 비디오 카메라로 촬영하여 편집한 것으로, impeller의 크기, 위치, 회전 속도(rpm), baffle의 사용 유무에 따라 gas bubble의 크기 및 분포가 달라지는 것을 볼 수 있으며, GBF 사용시에 최적의 처리 조건이 있음을 보여 준다.

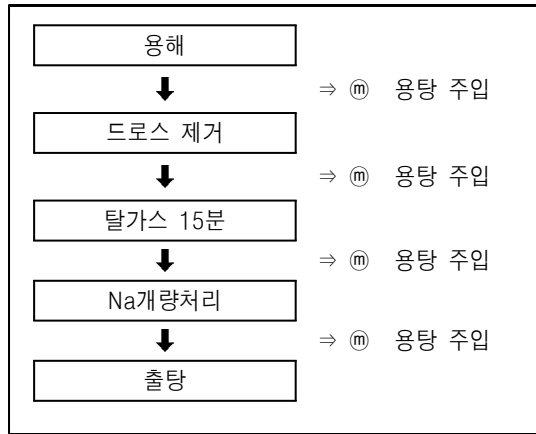


그림 10. 시험편 제조 공정

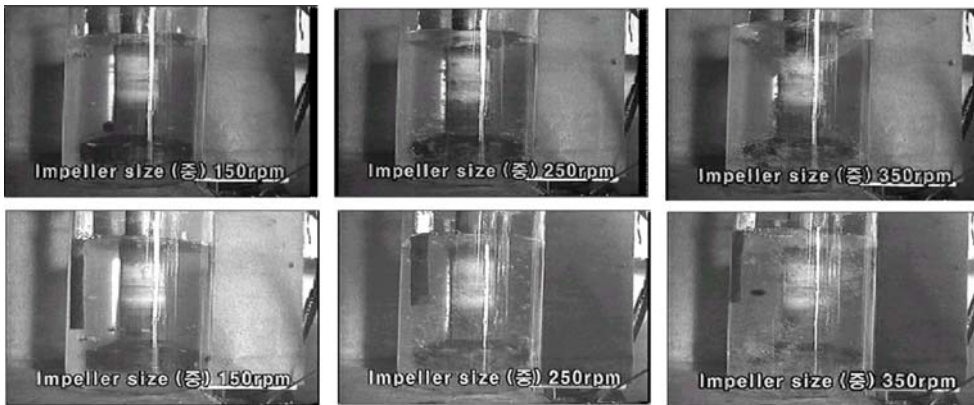


그림 9. 용탕교반 수모델 실험 결과

2.3.2 A357 합금의 용탕 처리에 따른 특성  
대신금속(주)에서 생산 설비로 이용하는 300kg급의 용해로에 A357합금을 용해하여 시험편을 제조하였다. 제조 공정 단계별 발생할 수 있는 문제점을 도출하기 위하여 각각의 단계(그림 10의 @으로 표시된 부분)에서 수소 농도를 측정하였다. 수소 농도는 ABB Bomem사의 용탕중 수소 농도분석기를 이용하여 측정하였다.

표 2에 공정별 수소 농도의 분석 결과를 요약하여 나타내었다.

표 2. 공정별 수소 농도 (단위 : ml/100g of Al)

공정	수소농도
용해	0.158
드로스 제거	0.141
탈가스 10분	0.114
탈가스 추가 10분	0.092
Na개량처리	0.106

표 3. A357 합금의 인장특성

	TS (MPa)	Elongation (%)
spec.	310	3
specimen	305-315	9-10

용해후에 측정된 값은 0.15ml/100g 이상의 높은 값을 보였다. 그러나 flux를 사용하여 dross를 제거한 다음에 측정하면 수소 농도의 값이 약간 감소한다. 탈가스 처리를 수행하면 용탕중의 수소 농도는 현저히 줄어드는데, 탈가스 처리 10분후에 측정된 값은 0.1ml/100g 이상의 값을 보였으나 탈가스 처리를 추가적으로 10분 더 해주는 경우에는 0.09ml/100g 정도의 수소 농도를 나타내었다. 탈가스 처리후 공정 Si의 개량 처리를 위하여 용탕에 Na를 처리하는데, Na 처리 후 측정된 결과를 보면, 수소 농도는 다시

0.1ml/100g 정도로 증가하였다. 표 3은 최종적으로 제조된 시험편의 인장 특성을 측정한 결과로, premium quality casting에서 요구하는 사양의 95%이상에 도달한 것을 알 수 있으며, 연신율은 이보다 상당히 높은 것을 알 수 있다.

### 3. 맺음말

이상과 같은 공정을 통하여 premium quality casting 제조기술을 확립하여 A357합금의 경우 인장강도가 310MPa, 연신율 9%의 합금을 제조할 수 있고, stop, support, inlet lip 등의 시제품을 제조 개발하였으며, 기계적 특성 및 치수, 비파괴검사 모두 요구 사양을 모두 만족하였다. Inlet frame은 시제품을 제조하여 2002년 7월 삼성테크윈(주)에 납품하였으며, 현재에도 삼성테크윈(주)으로부터 주문을 받아 납품을 하고 있다.

항공기용 고품위 알루미늄합금주조 부품 개발은 품질인증을 획득할 경우 물량확대와 추가로 대형 핵심부품까지도 확대가 가능하여 수입대체 및 OEM 수출이 기대되며, 각종 첨단국방장비 소재 국산화와 품질의 안정화를 기할 수 있고 민수용 일반 자동차의 경량화에도 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 재료의 고품질관리의 체계화 및 평가기술의 확립으로 불량률 감소에 따른 생산원가의 절감을 기대할 수 있다.